Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 1, Apr. May. 2021, p. 43- 53

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۰ ص.۵۳-۴۳

مقاله علمی- پژوهشی

# مدلسازی و بررسی تغییرات فیزیکوشیمیایی ماهی تونا تحت تاثیر روش انجمادزدایی اهمی غوطه‌وری

شهناز فتاحی[1]- نفیسه زمین‌دار[2*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶

## چکیده

انجمادزدایی در مبحث صنایع غذایی همواره چالشی بزرگ بوده است زیرا روش‌های سنتی باعث کاهش کیفیت ماده غذایی می‌شوند. انجمادزدایی اهمی یک روش حرارتی جایگزین، سریع و همگن است. در این پژوهش، انجمادزدایی ماهی تونا با روش اهمی به‌صورت غوطه‌وری در آب نمک با سه غلظت مختلف (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی/ حجمی سدیم کلرید) در شیب ولتاژ ۷/۱۴۳ ولت بر سانتی‌متر و فرکانس ۵۰ هرتز انجام شد. نمونه‌ها تا ۴۸ ساعت پس از انجمادزدایی در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. تغییرات افت انجمادزدایی، افت پخت، افت کل، ظرفیت نگهداری آب، بافت، متغیرهای رنگی *L*، a*، b* و تغییرات رنگ به‌صورت مدل‌های کینتیکی بررسی شدند. طبق نتایج، در طی زمان نگه داری افت انجمادزدایی، افت پخت، افت کل و ظرفیت نگهداری آب افزایش یافت. تغییرات رنگ (a* و b* ) و بافت نیز با افزایش زمان و غلظت آب نمک در سطح احتمال ۱٪ معنی دار شد. میزان تیوباربیتوریک اسید در اثر هیچ یک از متغیرهای مستقل معنی‌دار نشد. همچنین با افزایش غلظت آب نمک، افت پخت کاهش یافت. میزان نیروی برشی با گذشت زمان و افزایش غلظت آب نمک، کاهش یافت. متغیرهای وابسته با مدل‌های کینتیکی مناسب با بالاترین ضریب رگرسیون توصیف شدند. همچنین مدل‌های کینتیکی با $R^2$ و RMSE اعتبارسنجی شدند. این نتایج نشان‌دهنده بهبود خصوصیات فیزیکی محصول و عدم تشدید اکسیداسیون با روش انجمادزدایی اهمی از طریق غوطه‌وری در آب نمک است.

**واژه‌های کلیدی:** انجمادزدایی اهمی، مدلسازی کینتیکی ، ماهی تونا، حرارت‌دهی اهمی، تغییرات فیزیکوشیمیایی

## مقدمه

ماهی به‌عنوان یک منبع غنی از پروتئین، اسیدهای چرب غیراشباع، ویتامین و مواد مغذی مختلف، نقش به‌سزایی در رژیم غذایی انسان ایفا می‌کند (Khan *et al*, 2018; Li *et al*, 2017). تعدادی از کشورها به‌منظور تامین نیمی از پروتئین‌های مورد نیاز خود به ماهی متکی هستند (Khan *et al*, 2018). ماهی از جمله محصولات شدیداً فسادپذیر است (Roiha *et al*, 2018) که کیفیت آن تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد (García *et al*, 2015). روش‌های حفاظتی و نگهداری به‌خصوص سرد کردن، یخ زدن سرعت فساد را به حداقل رسانیده در حالی که بر ویژگی‌های فیزیکی ماهی اثر گذار نیست. بنابراین، اگر روش‌های سرد کردن و یخ زدن به درستی اعمال شوند، عمر ماندگاری محصول را از چندین روز به چندین ماه افزایش می‌دهند و کیفیت ماهی رفع انجماد شده بسیار مشابه نمونه تازه خواهد بود (Duygu and Ümit, Backi, 2017 ;2015). عمر ماندگاری ماهی عموماً توسط فعالیت میکروبی، ارزش غذایی، خواص ظاهری، بافت، طعم و رنگ آن تعیین می‌شود. تمامی این متغیرها تحت تاثیر فرآیندهای یخ زدن و انجمادزدایی و نیز انبارداری به‌صورت یخ زده هستند (Leygonie *et al*, 2012 Liu *et al*, 2017;). بریدن قطعات ماهی به‌صورت فیله از ماهی‌های منجمد، کاری بس دشوار است، بنابراین حد بحرانی از گرما نیاز است تا از وارد آوردن آسیب‌های بیش از حد به ماهی جلوگیری به عمل آید. مقدار گرمای داه شده برای انجمادزدایی قسمت‌های درونی قطعات ماهی باید کافی باشد به‌طوریکه تغییر فاز آب از جامد به مایع رخ دهد، به عبارت دیگر مقدار گرمای نهان ذوب برای این منظور لازم است (Backi, 2017) ( دمای سردترین نقطه به دمای مطلوب رسانیده شود(Llave *et al*, 2014)). البته فرآیند یخ زدن در مقایسه با فرآیند انجمادزدایی با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد ( Rahbari *et al*, 2018) زیرا آب در حالت انجماد نسبت به آب در فاز مایع از هدایت الکتریکی بالاتری برخوردار است. زمانی که فرآیند انجمادزدایی آغاز

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.
(* - نویسنده مسئول: Email: n.zamindar@khuisf.ac.ir)
DOI: 10.22067/ifstrj.v17i1.82740

می‌شود، لایه‌های بیرونی قطعات ماهی همچون یک عایق در برابر جریان گرما عمل می‌کنند، این درحالی است که برای فرآیند یخ زدن نتیجه معکوسی مشاهده می‌شود و انتقال گرما از طریق هدایت افزایش می‌یابد (Backi, 2017). به‌طور کلی روش‌های مورد استفاده برای فرآیندهای انجماد و انجمادزدایی نقش مهمی در حفظ کیفیت مواد غذایی یخ زده ایفا می‌کنند و تغییرات شیمیایی، فیزیکی و میکروبی که در طول انجمادزدایی رخ می‌دهند منجر به کاهش کیفیت محصول می‌شوند (Liu *et al*, 2017). غیرمخرب بودن روش انجمادزدایی به‌منظور به حداقل رساندن آسیب‌ها طی انجمادزدایی از جمله فاکتورهای اساسی در انتخاب روش انجمادزدایی مناسب است (Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2015). روش‌های زیادی برای انجمادزدایی مواد غذایی منجمد وجود دارد که شامل: انجمادزدایی در هوای ساکن، انجمادزدایی با جریان هوا، انجمادزدایی با دمای یخچالی، انجمادزدایی با آب سرد و گرم، انجمادزدایی با آب ساکن و تعدادی از روش‌های جدید در این زمینه از جمله، انجمادزدایی با میدان الکتریکی ولتاژ بالا، گرمایش اهمی، مایکروویو، فشار هیدروستاتیک بالا، انجمادزدایی با امواج صوتی[1]، فرکانس رادیویی و اشعه مادون قرمز را می‌توان نام برد (Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2015). در طی گرمایش اهمی با اعمال یک جریان الکتریکی متناوب، انرژی الکتریکی در داخل یک هادی الکتریسیته به‌طور کامل پراکنده شده و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود (Darvishi *et al*, 2013). در نتیجه نیازی به سطوح مبادله کننده حرارتی نیست و این فرآیند با کارآیی ۱۰۰٪ انجام می‌شود این در حالی است که کارآیی روش مایکروویو چیزی حدود ۶۵٪ است. نکته حائز اهمیت در گرمایش اهمی، رسانایی الکتریکی مشابه مواد جامد و مایع است. تمامی سبزیجات و مواد گوشتی رسانایی الکتریکی کمتری نسبت به مایعات داشته و این چنین کمبود در رسانایی الکتریکی را می‌توان با افزودن موادی همچون الکترولیت‌ها در نسبت‌های مناسب جبران کرد (Shim *et al*, 2010). از جمله مزایای گرمایش اهمی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: سرعت گرمایش بالا، ایجاد گرمایش حجمی، عدم ایجاد شیب دمایی، عدم سوختگی سطحی، روشی تمیز و دوستدار محیط زیست و کارآیی و بازدهی بسیار بالا (Darvishi *et al*, 2013; Athmaselvi *et al*, 2017).

با توجه به نگرانی‌ها در مورد حفظ کیفیت و ویژگی‌های کاربردی ماهی در طول انجمادزدایی و تاثیر پذیری مشخصات ظاهری، ساختمانی، ویژگی‌های حسی و فیزیکوشیمیایی محصول نهایی طی فرآیند انجمادزدایی، این مطالعه به بررسی تغییرات احتمالی در ماهی تونا[2] در طول انجمادزدایی اهمی و طی سه روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد پرداخته است.

## مواد و روش‌ها

ماهی تونا با نام علمی (*Thunnus albacares*)، هرکدام با وزن تقریبی ۱۰ کیلوگرم از مجتمع صنایع غذایی پگاه اصفهان، (اصفهان، ایران) تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌ها سرزنی شده و مراحل پاکسازی نمونه صورت گرفت و تمامی ماهیچه‌های قرمز جدا و برداشته شد. کلیه مواد شیمیایی با درجه خلوص بالا از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

### آماده‌سازی نمونه

پس از زدودن آلودگی و جداکردن قسمت‌های زائد، ماهیچه‌های سفید ماهی تونا با استفاده از چاقوی آشپزخانه به مکعب‌هایی با ابعاد (۳ × ۳ × ۳ سانتی متر) بریده و پس از بسته‌بندی در کیسه‌های پلی‌اتیلن تحت خلاء سریعاً در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد منجمد شدند. نمونه‌های منجمد در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند (Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2015).

### تعیین هدایت الکتریکی

قبل از شروع کار، هدایت الکتریکی (میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر) محلول آب نمک و نمونه ماهی اندازه‌گیری شد (Lascorz *et al*, 2016). به این منظور محلول آب نمک با غلظت‌های مختلف از ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی/ حجمی سدیم کلرید تهیه و ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد سپس با استفاده از هدایت‌سنج (متروهم، ۷۱۲، سوئیس) هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد. همچنین رسانایی الکتریکی خمیر ماهی اندازه‌گیری شد.

### دستگاه اهمی

دستگاه اهمی در مقیاس آزمایشگاهی شامل منبع تغذیه، ترانسفورماتور متغیر، پاورآنالایزر (آردینو- مگا-۲۵۶۰)، یک صفحه پردازشگر و همچنین یک عدد سلول آزمایشگاهی که از PTFE[3] یا تفلون ساخته شده است. این سلول، استوانه‌ای با قطر داخلی ۰/۰۷ متر، قطر خارجی ۰/۰۹ متر و طول ۰/۲۶ متر و دو عدد الکترود از جنس استیل ضدزنگ با ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر است. در طول فرآیند دما به دقت با استفاده از یک ترموکوپل نوع K اندازه گیری شد. ترموکوپل به‌صورت کامل با نوار تفلون پوشش‌دهی شده بود تا از ایجاد تداخل در میدان الکتریکی جلوگیری گردد.

1Acoustic

2 Tuna

3 Poly Tetra Fluoro Ethylene

### انجمادزدایی

پس از تعیین هدایت الکتریکی محلول آب نمک با غلظت‌های مختلف، غلظت‌های (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی حجمی سدیم کلرید) متناسب با هدایت الکتریکی ماهی انتخاب شد و با شیب ولتاژ ۷/۱۴۳ ولت بر سانتی‌متر در فرکانس ۵۰ هرتز به‌منظور انجمادزدایی استفاده شد.

برای گرمایش اهمی، محلول آب نمک با غلظت‌های مذکور به‌عنوان محیط گرمایش مورد استفاده قرار گرفت. سلول اهمی با محلول آب نمک (به میزان ۲۵۰ میلی‌لیتر) پر شد. نمونه مکعبی ماهی (۲۷ سانتی‌متر مکعب) منجمد تحت شرایط اهمی انجمادزدایی گردید. به این صورت که نمونه منجمد در مرکز سلول اهمی قرار گرفت و میدان الکتریکی بین دو الکترود اعمال شد. در هر بار آزمایش سلول اهمی از محلول آب نمک با غلظت‌های مشخص، پر شد. سپس نمونه با دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به ترموکوپل نوع k متصل شد، به نحوی که ترموکوپل دقیقا در مرکز هندسی نمونه قرار داده شد. سپس نمونه بر روی نگهدارنده قرار گرفت. سپس درب سلول بسته، شیب ولتاژ ۷/۱۴۳ ولت بر سانتی‌متر اعمال گردید. به محض رسیدن به دمای ۷- درجه سانتی‌گراد نمونه از سلول خارج و متغیرهای وابسته بلافاصله پس از انجمادزدایی (زمان صفر)، یک روز پس از انجمادزدایی (زمان ۲۴ ساعت) و دو روز پس از انجمادزدایی (زمان ۴۸ ساعت) طی سه تکرار اندازه‌گیری شد. زمان مورد نیاز به‌منظور افزایش دمای مرکز هندسی نمونه از ۱۸- به ۷- درجه سانتی‌گراد نیز محاسبه شد.

### تعیین زمان انجمادزدایی و سرعت انجمادزدایی

زمان مورد نیاز برای افزایش دمای مرکز هندسی نمونه مکعبی ماهی منجمد از ۱۸- به ۷- درجه سانتی‌گراد به‌عنوان زمان انجمادزدایی اندازه‌گیری شد. سرعت انجمادزدایی نیز با تقسیم کردن وزن نمونه منجمد (ترازوی دیجیتالی سه صفر، Mettler، AE200، سوئیس) به زمان انجمادزدایی (گرم بر ثانیه) محاسبه شد که در ادامه بیان شده است.

$$\text{سرعت انجمادزدایی} = \frac{A}{B} \qquad (۱)$$

که درآن A وزن نمونه منجمد (گرم) و B زمان انجمادزدایی (ثانیه) است (Mousakhani-ganjeh *et al*, 2016).

### تعیین افت انجمادزدایی

نمونه (۳×۳×۳ سانتی‌متر) منجمد قبل از انجمادزدایی توزین و بعد از انجمادزدایی نیز عصاره تراوش شده پاک و مجددا توزین شد و درصد افت انجمادزدایی از طریق معادله زیر محاسبه شد.

$$\text{درصد افت انجمادزدایی} = \frac{M_0 - M_{TT}}{M_0} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن $M_0$ وزن نمونه منجمد (گرم) و $M_{TT}$ وزن نمونه انجمادزدایی شده بعد از برداشتن عصاره تراوش شده (گرم) است (Rahbari *et al*, 2018).

### تعیین افت پخت و افت کل

به‌منظور اندازه‌گیری میزان افت پخت ۱۰ گرم از نمونه انجمادزدایی شده را بلافاصله در بسته بندی زیپ دار قرار داده و در حمام آب (بهداد، ایران) در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه غوطه‌ور شد به‌طوریکه دمای مرکز نمونه به ۷۵ درجه سانتی-گراد رسید.

$$\text{درصد افت پخت} = \frac{M_0 - M_T}{M_0} \times 100 \qquad (۳)$$

که در آن $M_0$ و $M_T$ وزن نمونه انجمادزدایی شده به‌ترتیب قبل و بعد از پخت است (Murphy and Marks, 2000).

درصد افت کل به صورت مجموع افت پخت و افت انجمادزدایی محاسبه شد (Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2015).

$$\text{درصد افت کل} = \text{درصد افت پخت} + \text{درصد افت انجمادزدایی} \qquad (۴)$$

### افت سانتریفوژ

۲ گرم از نمونه انجمادزدایی شده توزین و درون لوله سانتریفوژ (320 R، ایران) قرار گرفت. نمونه‌ها در ۳۰۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ شدند. سپس قرص گوشت با دقت از لوله خارج و سپس توزین شد. افت سانتریفوژ از تفاوت وزن اولیه و وزن ثانویه پس از پایان سانتریفوژ محاسبه شد.

$$\text{درصد افت سانتریفیوژ} = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1}\right) \times 100 \qquad (۵)$$

که درآن $M_1$ وزن اولیه گوشت، و $M_2$ وزن نمونه بعد از سانتریفوژ شدن است (Li *et al*, 2017).

### اکسیداسیون لیپیدها

به ۲۰ گرم نمونه چرخ شده ماهی تونا بلافاصله پس از انجمادزدایی،۵۰ میلی‌لیتر محلول تری کلرو استیک اسید (۲۰٪) افزوده و به مدت ۲ دقیقه به شدت مخلوط شد سپس ۵۰ میلی‌لیتر به محلول اولیه افزوده شد و سپس کل مواد از صافی گذشته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ رسانده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر از محلول صاف شده با ۵ میلی‌لیتر معرف تیوباربیتوریک اسید مخلوط گردید. لوله‌ها در بن‌ماری در حال جوش به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. سپس در

مخلوط آب و یخ به مدت ۵ دقیقه سرد شدند و مقدار جذب درطول موج ۵۳۲ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-120- ،Shimadzu 02، ژاپن) در مقابل نمونه شاهد قرائت شد، دانسیته نوری را در فاکتور تصحیح ۵/۴ ضرب گردید و بر حسب میلی‌گرم مالون آلدئید در کیلو گرم گوشت گزارش شد (اگان و همکاران، ۱۹۹۷).

میزان جذب در طول موج ۵۳۲× ۵/۴ = میزان اسید تیوباربیتوریک (۶)

### آنالیز بافت

آنالیز و بررسی بافت با دستگاه بافت‌سنج سنتام (STM-20، ایران) با تست وارنر براتزلر انجام شد. به‌منظور اجرای تست وارنر براتزلر تیغه V شکل برای برش نمونه ماهی رفع انجماد شده با نیروی ۵۰۰ نیوتن و سرعت ۵۰ میلی‌متر بردقیقه استفاده شد (Lascorz *et al*, 2016).

### اندازه‌گیری رنگ

رنگ نمونه مورد آزمون با استفاده از محفظه نوری و به صورت ارزش‌های CILAB شامل $L^*$ ( روشنی– تاریکی)، $a^*$ (قرمزی– سبزی) ، $b^*$ (زردی– آبی) با روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در زمان صفر، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از انجمادزدایی درون محفظه نوری با شرایط مشابه برای هر نمونه (موقعیت نور لامپ و فاصله میان دوربین و نمونه) قرارگرفته و سپس با استفاده از یک دروبین دیجیتال (کنن، A3100 IS، مالزی) عکس‌برداری انجام شد برای بدست آوردن همبستگی بهتر بین نمونه‌ها تفاوت رنگ سنجی ($\Delta E$) با معادله زیر محاسبه شد (Hong *et al*, ؛ Shi *et al*, 2008 2014).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (۷)$$

که در آن $L_0$ ، $a_0$ و $b_0$ روشنی، قرمزی/ سبزی و زردی/ آبی نمونه شاهد (نمونه پس از انجمادزدایی) و با $L$، $a$ و $b$ روشنی، قرمزی/ سبزی و زردی/ آبی نمونه‌های تیمار شده پس از ۲۴ و ۴۸ ساعت ماندگاری مقایسه شد.

### مدلسازی

مدلسازی با معادلات درجه واکنش صفر، یک و دو صورت گرفت:

$$A = A_0 + k_0 t \quad (۸)$$

$$A = A_0 \exp(k_1 t) \quad (۹)$$

$$\frac{1}{A} = k_2 t + \frac{1}{A_0} \quad (۱۰)$$

که در آنها A مقدار متغیر وابسته اندازه‌گیری شده در زمان t، $A_0$ مقدار اولیه متغیر وابسته اندازه‌گیری شده در زمان $t = 0$ ،متغیر t مشخصه زمان نگهداری (day) می‌باشد. $k_0$ ثابت سرعت واکنش درجه صفر ($day^{-1}$)، $k_1$ ثابت سرعت واکنش درجه یک ($day^{-1}$) و $k_2$ ثابت سرعت واکنش درجه دو ($day^{-1}$) است.

### معتبرسازی مدل

معتبرسازی مدل با توجه به داده‌های حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی (سه تکرار) از طریق ثبت اطلاعات در طول فرآیند انجمادزدایی به‌دست آمد و میانگین آنها با داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار گرفت و میزان ریشه مربعات میانگین خطا[1] از طریق رابطه ۸ محاسبه شد (Erdogdu and Tutar, 2012)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_{exprimental} - T_{simulation})^2} \quad (۱۱)$$

که در آن $T_{exprimental}$ داده‌های آزمایشگاهی، $T_{simulation}$ داده‌های به‌دست آمده از مدل و N تعداد داده‌ها است.

### تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

بررسی متغیرهای زمان انجمادزدایی و سرعت انجمادزدایی در قالب طرح کاملاً تصادفی با متغیر غلظت در سه سطح (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی/ حجمی سدیم کلرید) در سه تکرار انجام شد. بررسی متغیرهای افت انجمادزدایی، افت پخت ، افت کل، WHC، TBA، بافت و رنگ ($L^*$، $a^*$، $b^*$ و $\Delta E$) با آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با دو متغیر زمان در سه سطح (صفر، ۲۴ و۴۸ ساعت) و غلظت آب نمک در سه سطح (۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی/ حجمی سدیم کلرید) در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه واریانس و مقایسه میانگین (آزمونLSD[2] ) از نرم‌افزار SAS در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد. متغیرها نیز با مدل کینتیکی مناسب طی زمان (زمان صفر، ۲۴ و ۴۸ ساعت) بررسی و بهترین مدل با ضریب رگرسیون بالا بر روی آنها انطباق داده شد. نمونه بهینه روش اهمیک از نظر پارامترهای زمان انجمادزدایی، افت انجمادزدایی و بافت با روش انجمادزدایی سنتی (هوا) با آزمون $T_{student}$ مقایسه شد.

1Root Mean Square Error
2 Least Significant Differernce

## نتایج و بحث

### ترکیب شیمیایی ماهی تونا

ترکیبات شیمیایی ماهی بسته به نوع گونه آن‌ها بسیار متفاوت و گسترده است. تفاوت‌های مشاهده شده میان گونه‌های فردی ناشی از تفاوت‌ها در سن، جنس، محیط و دریا است. به هرحال تفاوت‌های خاص در ترکیبات شیمیایی ماهی‌ها بستگی به نوع غذاهای مصرف شده توسط آن‌ها دارد (جدول ۱).

**جدول ۱- ترکیب شیمیایی تقریبی ماهی تونای خام منجمد**

| ترکیب | رطوبت(٪) | پروتئین(٪) | چربی(٪) | خاکستر(٪) |
|---|---|---|---|---|
| | ۷۵/۳۳±۱/۳۳ | ۱۶/۱۳۵±۰/۰۱۵ | ۲/۳±۰/۳ | ۲/۰۲۵±۰/۱۲۵ |

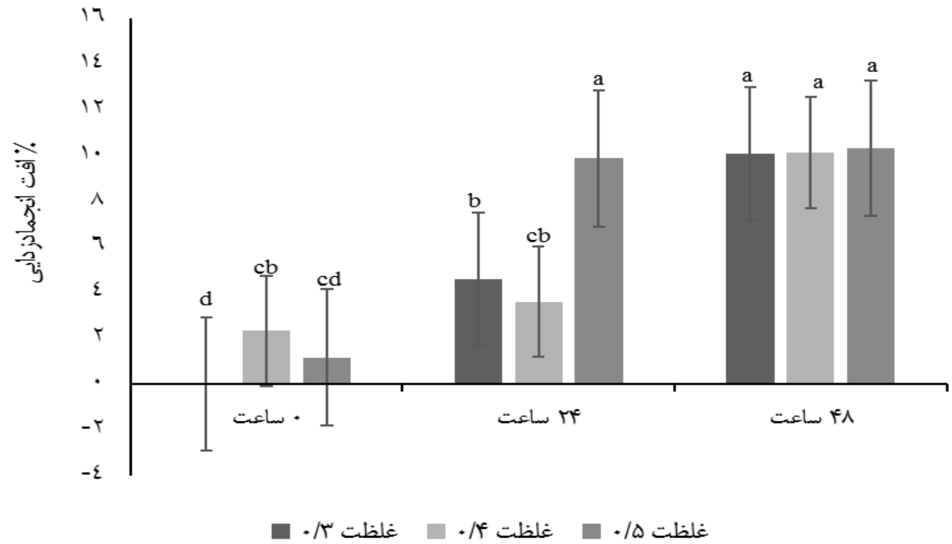
اعداد به صورت میانگین ±انحراف معیار نشان داده شده‌اند

### سرعت انجمادزدایی و زمان انجمادزدایی

تغییرات زمان انجمادزدایی و سرعت انجمادزدایی را در غلظت‌های مختلف آب نمک بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار با افزایش غلظت آب نمک ($P\geq۰/۰۵$) در این پژوهش بود. در مقایسه روش اهمیک و روش سنتی انجمادزدایی (هوا) مشخص شد که روش اهمیک به‌طور معنی‌داری باعث کاهش زمان انجمادزدایی در مقایسه با هوا شد ($P\leq۰/۰۱$). زمان انجمادزدایی یکی از مهمترین شاخص‌ها در صنعت انجمادزدایی است (جدول ۵).

### افت انجمادزدایی، افت پخت و افت کل

میزان افت انجمادزدایی در سه غلظت مختلف بررسی و با مدل‌های کینتیکی توصیف شد. مدل‌های کینتیکی مناسب در غلظت ۰/۳ درصد (درجه صفر و $R^2$ =۰/۹۹۷۵)، در غلظت ۰/۴ درصد (درجه دو و $R^2$ =۰/۹۹۳) و در غلظت ۰/۵ درصد (درجه صفر و $R^2$ =۰/۹۵۸۶) در جدول ۲ نشان داده شد. با توجه به معادلات مشخص شده در جدول ۲، در غلظت ۰/۵ درصد نسبت به غلظت آب نمک ۰/۳ درصد افت انجمادزدایی با افزایش زمان با شیب سریع‌تری اتفاق افتاد.




**شکل ۱- اثرات متقابل زمان و غلظت بر افت انجمادزدایی در ولتاژ ۵۰ ولت.**
نتایج میانگین سه تکرار. مقایسات میانگین با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ انجام شده است.

اثر متقابل دو متغیر (غلظت× زمان) بر روی افت انجمادزدایی در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار شد، به‌گونه‌ای که در ساعت صفر پس از انجمادزدایی و غلظت‌های مختلف آب نمک، میزان افت انجمادزدایی در ۰/۳ درصد و ۰/۵ درصد تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین غلظت ۰/۴ درصد و ۰/۵ درصد در ساعت صفر تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشتند. با گذشت ۲۴ ساعت میزان افت انجمادزدایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت به‌طوریکه در غلظت ۰/۵ درصد بیشترین افت مشاهده شد ولی غلظت ۰/۳ درصد و ۰/۴ درصد تفاوتی نداشتند

و پس از گذشت ۴۸ ساعت نیز میزان افت افزایش یافت، اما تفاوت معنی‌داری بین غلظت ۰/۵ درصد در ۲۴ ساعت با هیچ یک از سطوح غلظت در ۴۸ ساعت مشاهده نشد (شکل ۱). در مقایسه روش اهمیک و روش سنتی انجمادزدایی (هوا) مشخص شد که روش اهمیک به‌طور معنی‌داری باعث کاهش افت انجمادزدایی در مقایسه با هوا شد (P≤۰/۰۱). کاهش افت انجمادزدایی به منزله کاهش ضایعات و هدر رفت ماهی است (جدول ۵).

میزان افت پخت در سه غلظت مختلف و طی سه روز متوالی اندازه‌گیری شد و نتایج به‌صورت مدل کینتیکی بیان شد. افت پخت در غلظت ۰/۳ درصد (درجه ۲ و $R^2$ =۰/۸۸۵۷)، در غلظت ۰/۴ درصد (درجه ۲ و $R^2$ =۰/۹۹۷۵) و در غلظت ۰/۵ درصد (درجه ۲ و $R^2$ =۰/۸۵۲۶) توصیف شده است (جدول ۲). می‌توان اشاره کرد که مدل درجه ۲ برای توصیف این داده‌ها در تمامی غلظت‌ها به‌خوبی صدق کرده است. میزان افت پخت در غلظت ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی سدیم کلرید با شیب یکسانی با گذشت زمان کاهش یافته است.

بر طبق نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز می‌توان بیان کرد که افزایش غلظت آب نمک باعث کاهش میزان افت پخت شد و به لحاظ آماری نیز تفاوت معنی‌داری بین سه غلظت مورد استفاده در سطح احتمال ۱٪ گزارش شد (جدول ۳).

از نظر متغیر زمان نیز مشاهده شد که با گذشت زمان طی سه روز متوالی میزان افت پخت افزایش یافت و در سطح احتمال ۱ ٪ نیز تفاوت معنی‌داری بین سطوح زمان نیز مشاهده شد (جدول ۴). افت پخت ناشی از مایع و مواد محلول در آن است که طی پخت از گوشت خارج می‌شود.

**جدول ۲- مدل کینتیکی متغیرهای افت انجمادزدایی، افت پخت، افت کل، WHC، TBA، بافت و رنگ تحت تاثیر غلظت آب نمک**

| متغیر وابسته | غلظت آب نمک | مدل کینتیکی | معادله واکنش | $R^2$ | معادله خط اعتبارسنجی | RMSE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| افت انجمادزدایی | ۰/۳ | درجه صفر | y = ۰/۲۱ x −۰/۱۴۶ | ۰/۹۹۷ | y= ۰/۹۹۷۶ + ۰/۰۱۲۳ | ۰/۲۰۶ |
| افت پخت | ۰/۳ | درجه دو | y = −۰/۰۰۰۳ x + ۰/۰۶۵ | ۰/۸۸۶ | y= ۰/۹۳۸۸ + ۰/۰۰۳۲ | ۲/۰۵۷ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| افت کل | ۰/۳ | درجه یک | y = ۰/۰۱۳۵ x +۲/۷۵۶ | ۰/۹۹۹ | y = ۱/۰۰۰۱ + ۰/۰۰۰۲ | ۸/۶۹۵ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| WHC | ۰/۳ | درجه صفر | y = ۰/۱۳۲ x + ۸۴/۱۱۲ | ۰/۹۹۶ | y= ۰/۹۹۶۵+ ۰/۳۰۹۲ | ۰/۱۵۸ |
| TBA | ۰/۳ | درجه یک | y = ۰/۰۱۴ x −۰/۳۱۳ | ۱/۰۰ | y = ۰/۹۹۹۳ − ۰/۰۰۰۲ | ۱/۲۰۴ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| بافت | ۰/۳ | درجه یک | y = −۰/۰۰۸ x + ۲/۴۳ | ۰/۹۶۰ | y = ۰/۹۵۵۸ + ۰/۰۰۴۹ | ۳/۷۲۸ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| رنگ | ۰/۳ | درجه دو | y = ۰/۰۰۲۵ x +۰/۳۳۴ | ۰/۹۲۳ | y = ۰/۹۲۳۶ + /۰۳۰۱ | ۰/۰۱۴ |
| **متغیر وابسته** | **غلظت آب نمک** | **مدل کینتیکی** | **معادله واکنش** | **$R^2$** | **معادله خط اعتبارسنجی** | **RMSE** |
| افت انجمادزدایی | ۰/۴ | درجه دو | y = −۰/۰۰۷۳ x +۰/۴۲۱ | ۰/۹۹۳ | y= ۰/۹۸۷۲x + ۰/۰۰۴۱ | ۰/۰۱۲ |
| افت پخت | ۰/۴ | درجه دو | y = −۰/۰۰۰۲ x +۰/۰۶۹ | ۰/۹۹۷ | y = ۰/۸۸۳x + ۰/۰۰۸ | ۸/۳۰۱ × ۱۰<sup>−۴</sup> |
| افت کل | ۰/۴ | درجه دو | y = −۰/۰۰۰۵ x +۰/۰۶۰۴ | ۰/۹۷۵ | y = ۰/۸۹۳۹x + ۰/۰۰۶۱ | ۲/۲۱۶ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| WHC | ۰/۴ | درجه یک | y = ۰/۰۰۰۹ x +۴/۴۲ | ۰/۹۷۰ | y = ۰/۸۷۸۸x+ ۰/۰۰۱۴ | ۵/۸۹۹ × ۱۰<sup>−۵</sup> |
| TBA | ۰/۴ | درجه صفر | y = ۰/۰۱۱۶ x +۰/۶۷ | ۰/۹۹۸ | y = ۱/۰۰۱۸ x− ۰/۰۰۰۷ | ۸/۸۰۳ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| بافت | ۰/۴ | درجه دو | y = ۰/۰۰۱۸ x +۰/۱۰۶ | ۰/۸۵۵ | y = ۰/۸۶۶۶ x+ ۰/۰۲۰۳ | ۰/۰۱۴ |
| رنگ | ۰/۴ | درجه دو | y = ۰/۰۰۵۴ x +۰/۲۶۵۴ | ۰/۹۴۵ | y = ۰/۹۵۳۵ x+ ۰/۰۱۹۴ | ۶/۳۸ × ۱۰<sup>−۴</sup> |
| **متغیر وابسته** | **غلظت آب نمک** | **مدل کینتیکی** | **معادله واکنش** | **$R^2$** | **معادله خط اعتبارسنجی** | **RMSE** |
| افت انجمادزدایی | ۰/۵ | درجه صفر | y = ۰/۲۲۶ x +۲/۲۸۴ | ۰/۹۶۰ | y= ۰/۹۵۸۵x + ۰/۳۲ | ۰/۹۲۱ |
| افت پخت | ۰/۵ | درجه دو | y = −۰/۰۰۰۳ x +۰/۰۷۶ | ۰/۸۵۳ | y = ۰/۸۷۶۱x + ۰/۰۰۸۴ | ۲/۳۹ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| افت کل | ۰/۵ | درجه صفر | y = ۰/۲۹ x +۱۵/۷۴۶ | ۰/۹۸۴ | y = ۰/۹۸۴۱x + ۰/۳۶۳ | ۰/۶۴۳ |
| WHC | ۰/۵ | درجه صفر | y = ۰/۰۷۸ x +۸۳/۳۷ | ۰/۸۹۳ | y = ۰/۸۹۲۶x+ ۹/۱۶ | ۰/۵۳ |
| TBA | ۰/۵ | درجه دو | y = −۰/۰۱۸۶ x +۲/۰۶۹ | ۰/۸۵۰ | y = ۰/۸۴۵۴+ x ۰/۲۵۱۳ | ۰/۱۵۵ |
| بافت | ۰/۵ | درجه دو | y = ۰/۰۰۱۳ x +۰/۱۴۸ | ۰/۹۶۰ | y = ۰/۹۹۱ x+ ۰/۰۰۳ | ۵/۴۶۸ × ۱۰<sup>−۳</sup> |
| رنگ | ۰/۵ | درجه صفر | y = −۰/۰۳۷ x +۳/۱۲۷ | ۰/۹۹۸ | y= ۰/۹۹۹۷ x− ۸ × ۱۰<sup>−۵</sup> | ۱/۹۵ |

RMSE= Root Mean Square Error

جدول ۳- اثرات غلظت‌های محلول آب نمک بر متغیرهای افت پخت، WHC ، بافت، *a ، *b در ولتاژ ثابت ۵۰ ولت

| غلظت | ٪افت پخت | %WHC | بافت | a* | b* |
|---|---|---|---|---|---|
| غلظت ۰/۳ درصد | $۱۷/۱۷±۲/۵۴^{a}$ | $۸۷/۲۸±۳/۲۶^{a}$ | $۹/۵۷±۰/۸۵^{a}$ | $۲/۹۲±۰/۴۷^{ab}$ | $۴/۴۵±۰/۴۹^{b}$ |
| غلظت ۰/٤ درصد | $۱۵/۸۶±۱/۳۸^{b}$ | $۸۳/۲۸±۳/۹۱^{b}$ | $۷/۳۱±۰/۱۶^{b}$ | $۳/۲۹±۰/۶۷^{a}$ | $۵/۰۴±۰/۲۹^{a}$ |
| غلظت ۰/۵ درصد | $۱۴/۵۷±۱/۳۸^{c}$ | $۸۶/۷۲±۲/۶۶^{a}$ | $۶/۳۳±۰/۴۵^{b}$ | $۲/۲±۰/۰۹^{b}$ | $۵/۰۵±۰/۲۱^{a}$ |

اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند، اختلاف معنی‌داری از نظر صفات مورد بررسی از لحاظ آزمون LSD با یکدیگر ندارند (P≤۰/۰۵).

جدول٤- اثرات زمان‌های نگهداری پس از رفع انجماد بر متغیرهای افت انجمادزدایی، افت پخت، افت کل، WHC، بافت، *a، *b، ΔE در ولتاژ ثابت ۵۰ ولت

| زمان (ساعت) | ٪ افت انجمادزدایی | ٪افت پخت | ٪افت کل | %WHC | بافت | a* | b* | ΔE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| صفر | $۱/۱۷±۰/۳۳^{c}$ | $۱۴/۶۳±۱/۱^{b}$ | $۱۵/۸±۱/۵۱^{c}$ | $۸۲/۷۲±۳/۶۸^{b}$ | $۱۰/۲۹±۰/۶۴^{a}$ | $۴/۱۹±۰/۴۸^{a}$ | $۵/۵۴±۰/۸۶^{a}$ | $۰±۰^{b}$ |
| ۲٤ | $۶/۰۱±۰/۱۵^{b}$ | $۱۵/۰۲±۱/۴۴^{b}$ | $۲۱/۰۳±۲/۷۶^{b}$ | $۸۶/۶۷±۲/۲۲^{a}$ | $۶/۷۴±۰/۰۹^{b}$ | $۲/۳۴±۰/۹۲^{b}$ | $۳/۷۳±۰/۴^{b}$ | $۲/۹۳±۰/۱۹^{a}$ |
| ٤۸ | $۱۰/۱۶±۰/۷۶^{a}$ | $۱۷/۹۳±۱/۸۶^{a}$ | $۲۸/۱±۴/۰۹^{a}$ | $۸۷/۸۹±۲/۹۳^{a}$ | $۶/۱۸±۰/۷۷^{b}$ | $۱/۸۷±۰/۶۲^{b}$ | $۵/۲۷±۰/۷۴^{a}$ | $۲/۷۶±۰/۳۶^{a}$ |

اعدادی که دارای حداقل یک حرف مشابه هستند، اختلاف معنی‌داری از نظر صفات مورد بررسی از لحاظ آزمون LSD با یکدیگر ندارند (P ≤۰/۰۵).

افت کل در غلظت ۰/۳ درصد با مدل کینتیکی (درجه یک و $R^2$ =۰/۹۹۸۹)، در غلظت ۰/۴ درصد (درجه دو و $R^2$ =۰/۹۷۴۸)، در غلظت ۰/۵ درصد (درجه صفر ۰/۹۸۳۹= $R^2$) در جدول۲ توصیف شده است. میزان افت کل در غلظت ۰/۵ و ۰/۳ درصد به‌ترتیب با شیب بیشتری افزایش یافت. افت کل در غلظت ۰/۴ درصد سدیم کلرید دارای شیب نزولی بوده است.

در بررسی افت کل از نظر متغیر غلظت تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. به لحاظ متغیر زمان و با بررسی در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری میان سطوح زمان ملاحظه گردید به‌نحوی که بلافاصله بعد از انجمادزدایی کمترین و پس از گذشت ۴۸ ساعت بیشترین میزان افت کل مشاهده شد (جدول ۴). بنابراین اینگونه می‌توان اظهار کرد که، اگرچه افت کل در سطوح مختلف غلظت معنی‌دار نیست اما از آن جایی که افت کل حاصل جمع افت انجمادزدایی و افت پخت است می‌توان بیان کرد که تاثیر متغیر زمان بر هر دو افت انجمادزدایی و افت پخت معنی‌دار شد بنابراین تاثیر زمان بر افت کل نیز در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار گردید. سرعت متفاوت دناتوراسیون پروتئین‌ها بر اساس میدان الکتریکی (موسی خانی و همکاران، ۲۰۱۵) و غلظت نمک عامل اصلی تفاوت در افت انجمادزدایی و افت پخت است (کیم و همکاران، ۲۰۰۶) که در غلظت‌های مختلف و با گذشت زمان سرعت دناتوراسیون پروتئین‌ها متفاوت بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت زمان در همه غلظت‌ها میزان افت انجمادزدایی افزایش یافته است.

## ظرفیت نگهداری آب (WHC)

مدل‌های کینتیکی مناسب برای WHC در غلظت‌های ۰/۳ درصد (درجه صفر با ۰/۹۹۶۳= $R^2$)، ۰/۴ درصد (درجه یک با $R^2$ =۰/۹۷)، ۰/۵ درصد (درجه صفر با ۰/۸۹۲۹= $R^2$ ) بود (جدول ۲). میزان WHC در غلظت ۰/۳ نسبت به ۰/۵ درصد سدیم کلرید با شیب بیشتری افزایش یافته است.

گزارش آماری WHC حاکی از معنی‌داری این متغیر در سطح احتمال ۱٪ از نظر هر دو متغیر (غلظت و زمان) بود به‌نحوی که غلظت ۰/۴ درصد آب نمک نسبت به سایر غلظت‌های آب نمک کمتر، و در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۳). در بررسی اثر زمان، نتایج نشان‌دهنده افزایش WHC با گذشت زمان بود به‌نحوی که کمترین میزان WHC در ساعت صفر و بیشترین WHC در ۴۸ ساعت گزارش شد اما بین سطوح ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴). میزان WHC در محصولات گوشتی یکی از مهمترین فاکتورهای اثرگذار بر روی ارزش اقتصادی و کیفیت گوشت است که ناشی از تغییرات وزن طی انجمادزدایی است (کیم و همکاران، ۲۰۰۶؛ لی و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از سدیم کلرید در همبرگرهای منجمد منجر به افزایش WHC نسبت به همبرگرهای بدون سدیم کلرید شده بود. در محصولات گوشتی عمدتا کلرید سدیم در اتصال آب و چربی از طریق شبکه میوفیبریلی و به‌خصوص حلالیت پروتئین‌های میوفیبریلی شرکت کرده است (کیم و همکاران، ۲۰۰۶؛ هانگ و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش نیز افزایش غلظت سدیم کلرید منجر به افزایش WHC شد که مطابق با یافته‌های قبلی بود.

**اکسیداسیون لیپیدها**

مدل کینتیکی حاصل شده برای سنجش TBA در سه غلظت ۰/۳ درصد (درجه یک با $R^2$ =۰/۹۹۹۱)، ۰/۴ درصد ( درجه صفر با $R^2$ =۰/۹۹۸۵) ، ۰/۵ درصد (درجه دو با $R^2$ =۰/۸۴۶۵) گزارش شده است (جدول ۲). معادلات نشان داده‌اند که میزان TBA در غلظت ۰/۳ و ۰/۴ درصد با شیبی تقریبا برابر روند افزایشی داشته است.

نتایج حاکی از عدم اثر معنی‌دار برای این متغیر بود. به عبارت دیگر نشان‌دهنده عدم تاثیر شرایط انجمادزدایی اهمی بر اکسیداسیون لیپدها در نمونه ماهی بوده است. کیم و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که سدیم کلرید حاضر در محلول آب نمک، طی سرعت بالای انجمادزدایی اهمی نمی‌توانست با لیپیدها واکنش دهد و تاثیری بر اکسیداسیون لیپیدها ندارد که طی این پژوهش نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد و حضور نمک به صورت محلول در غلظت‌های ناچیز مصرفی منجر به اکسیداسیون لیپیدها نشد. اکسیداسیون لیپیدها دلیل اصلی از بین رفتن کیفیت گوشت است. فرآیندهای حرارتی می‌تواند باعث تسریع اکسیداسیون لیپیدها توسط شکستن غشای سلولی و رهایی پرواکسیدان‌ها شود. محققان دریافتند که افزایش اکسیداسیون در همبرگرهای بدون کلرید سدیم نسبت به همبرگرهای حاوی کلرید سدیم بسیار قابل توجه‌تر است و این نشان‌دهنده این است که افزودن کلرید سدیم تاثیری بر افزایش اکسیداسیون لیپیدها ندارد. مطالعات انجام شده بر روی تاثیر سدیم کلرید متفاوت است در حالی که بسیاری از نویسندگان سدیم کلرید را به‌عنوان پرواکسیدان معرفی کرده‌اند اما از طرف دیگر بسیاری بر خاصیت آنتی‌اکسیدانی آن تاکید کرده‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۰۶).

**بافت**

مدل‌های کینتیکی برای غلظت‌های ۰/۳ درصد (درجه یک با $R^2$ =۰/۹۶)، ۰/۴ درصد (درجه دو با $R^2$ =۰/۸۵۴۸) و ۰/۵ درصد (درجه دو با $R^2$ =۰/۹۵۵) حاصل شد (جدول ۲). معادلات حاکی از افزایش شیب بیشتری در غلظت ۰/۴ نسبت به ۰/۵ درصد سدیم کلرید بوده است. اثرات دو متغیر مستقل غلظت و زمان بر روی تغییرات بافت در سطح احتمال ۱ ٪ معنی‌دار شد به‌طوریکه اثر غلظت بر روی بافت معنی‌دار شد و بافت نمونه رفع انجماد شده با غلظت آب نمک ۰/۳ درصد از استحکام بالاتر و غلظت ۰/۵ درصد از استحکام کمتری برخوردار بودند اما در بین سطوح ۰/۴ درصد و ۰/۵ درصد اختلاف معنی داری مشاهده نشد (جدول ۳). از نظر متغیر زمان نیز نتایج مشابهی با نتایج تیمار غلظت بدست آمد که نمونه بلافاصله بعد از رفع انجماد از استحکام بیشتری نسبت به سایر زمان‌ها برخوردار بود و بین دو سطح دیگر زمان (۲۴- ۴۸ ساعت) اختلاف معنی داری مشاهده نشد (جدول ۴). بنابراین در این پژوهش مشاهده شد که بافت نمونه از استحکام خوبی پس از انجمادزدایی برخوردار بود که نتایج قبلی را تایید کرد. محققان دریافتند که انجمادزدایی اهمی به صورت غوطه‌وری سبب حفظ کیفیت و انسجام بافت شد و نسبت به انجمادزدایی تماسی بافت مستحکم‌تری را ارائه داد به طوریکه نیروی برشی بیشتری صرف شده است (هانگ و همکاران، ۲۰۱۴). در مقایسه روش اهمیک و روش سنتی انجمادزدایی (هوا) مشخص شد که روش اهمیک به طور معنی‌داری باعث افزایش استحکام بافت نمونه در مقایسه با هوا شد (P≤۰/۰۱) (جدول ۵).

**جدول ۵- نتایج آزمون T برای مقایسه نمونه بهینه اهمیک و روش سنتی انجمادزدایی (هوا)**

| | زمان انجمادزدایی | ٪ افت انجمادزدایی | بافت |
|---|---|---|---|
| مقدار $T_{student}$ | ۲۲/۶۳** | ۵/۷۹** | ۸/۸۰** |

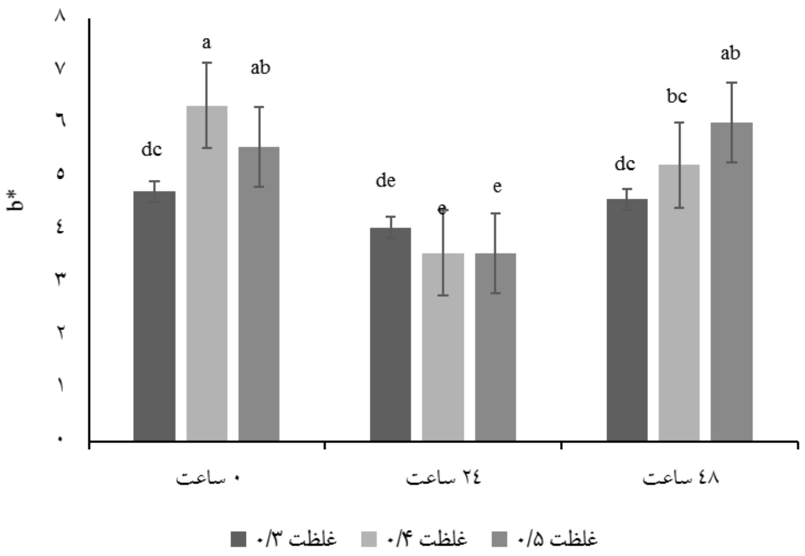
نتایج میانگین سه تکرار. (P ≤۰/۰۱)

**رنگ**

مدل‌های کینتیکی شاخص رنگ به ترتیب برای غلظت‌های ۰/۳ درصد (درجه دو با $R^2$ =۰/۹۲۳)، ۰/۴ درصد (درجه دو با $R^2$ =۰/۹۴۵) و ۰/۵ درصد (درجه صفر با $R^2$ =۰/۹۹۸) حاصل شد (جدول ۲). معادلات با درجه یکسان برای توصیف متغیر رنگ، بیان کننده افزایش شیب با گذشت زمان در غلظت‌های ۰/۴ و ۰/۳ است که در غلظت ۰/۴ درصد با شیب بیشتری افزایش داشته است.

از بین سه مشخصه متغیرهای رنگی ($L^*$، $a^*$، $b^*$ ) تنها اثر متقابل (غلظت × زمان) بر $b^*$ معنی دار شد و در ساعت صفر و غلظت ۰/۴ درصد بیشترین زردی مشاهده شد و کمترین زردی مربوط به غلظت ۰/۴ و ۰/۵ درصد در ۲۴ ساعت بود (شکل ۲). $a^*$ نیز در اثر هر دو متغیر غلظت و زمان معنی دار شد. در بررسی اثر زمان بر روی $a^*$ مشاهده شد که بیشترین قرمزی در ساعت صفر و کمترین قرمزی پس از ۴۸ ساعت وجود داشت و بین ۲۴ و ۴۸ ساعت تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۱ ٪ ملاحظه نشد (جدول ۴). از نظر متغیر غلظت تفاوت معنی دار بین غلظت ۰/۴ درصد و ۰/۵ درصد در سطح احتمال ۵ ٪ مشاهده شد اما با غلظت ۰/۳ درصد و ۰/۵ درصد تفاوت معنی داری ملاحظه نشد (جدول ۳). $L^*$ در هیچ یک از متغیرهای مختلف غلظت و زمان معنی دار نشد. $\Delta E$ در اثر زمان معنی دار شد و

کمترین تغییرات رنگ در زمان صفر و بیشترین تغییرات رنگ در زمان ۲۴ و ۴۸ ساعت مشاهده شد (جدول ۶).




**شکل ۲- اثرات متقابل زمان و غلظت بر b* در ولتاژ ۵۰ ولت.**
نتایج میانگین سه تکرار. مقایسات میانگین با آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ انجام شده است.

## نتیجه‌گیری

ماهی به عنوان یک منبع غذایی سرشار از پروتئین از جایگاه خاصی در سبد غذایی خانواده‌ها برخوردار است اما به دلیل عدم عرضه ماهی به صورت تازه بسیاری به مصرف کنسرو ماهی روی آورده‌اند و بنابراین حفظ کیفیت و ارزش غذایی در این محصول نیز همچون نمونه تازه بایستی رعایت گردد. روش انجماد زدایی اهمی علاوه بر جلوگیری از اتلاف وقت و سرعت بالا منجر به کاهش متغیرهای افت شد ضمن اینکه ظرفیت نگه‌داری آب در بالاترین حد ممکن حفظ گردید. از طرفی یکی از مهمترین مسائل در ارتباط با ماهی اکسیداسیون لیپدها است زیرا ماهی از محصولات بسیار مستعد به فساد است و با این روش با توجه به حضور نمک هیچ گونه علائمی که ناشی از تشدید اکسیداسیون باشد مشاهد نگردید و در مقایسه با سایر روش‌های الکتریکی سوختگی در لبه‌ها و اطراف نمونه مشاهده نشد و نقطه سرد نمونه به دمای نهایی رسیده بود. از جمله موارد موثر بر این نوع انتقال حرارت، اندازه ذرات غذا، دمای اولیه محصول، خصوصیات حرارتی و الکتریکی، بافت، نوع فرمولاسیون و غیره است که در نهایت بر ویژگی‌های حسی و ارزش تغذیه‌ای محصول و بسیاری از موارد دیگر اثر گذار است. انجمادزدایی اهمی به صورت غوطه‌وری سبب حفظ کیفیت و انسجام بافت شده است و بافت مستحکم‌تری ایجاد کرده به طوریکه نیروی برشی بیشتری صرف شد. متغیرهای وابسته با مدل‌های کینتیکی مناسب با بالاترین ضریب رگرسیون توصیف شدند. همچنین مدل‌های کینتیکی با $R^2$ و RMSE اعتبارسنجی شدند. نتایج مدل‌های اعتبارسنجی شده باعث پیش بینی متغیرهای وابسته در زمان و غلظت‌های مختلف شده است و از این رو انتخاب شرایط مناسب با کمترین افت و بهترین خصوصیات بافتی و رنگ را در نمونه ماهی انجمادزدایی شده امکان پذیر کرده است.

## منابع

Athmaselvi, K. A., Kumar, C., & Poojitha, P. 2017. Influence of temperature , voltage gradient and electrode on ascorbic acid degradation kinetics during ohmic heating of tropical fruit pulp. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1), 144–155.

Backi, C. J. 2017. Methods for ( industrial ) thawing of fish blocks : a review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), 1-11.

Darvishi, H., Khostaghaza, M. H., & Najaf, G. 2013. Ohmic heating of pomegranate juice : electrical conductivity and pH change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 101–108.

Duygu, B., & Ümit, G. 2015. Application of ohmic heating system in meat thawing. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 195, 2822–2828.

Egan, H., Kirk, R.S., and Sawyer, R. 1997. Pearson's chemical analysis of food (9nd ed), Churchill Livingstone, Londen, New york.

Erdogdu, F., & Tutar, M. 2012. A computational study for axial rotation effects on heat transfer in rotating cans containing liquid water , semi-fluid food system and headspace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 3774–3788.

García, M., Vilas, C., Herrera, J. R., Bernárdez, M., Balsa-Canto, E., & Alonso, A. A. 2015. Quality and Shelf-life prediction for retail fresh hake ( *Merluccius merluccius* ). *International Journal of Food Microbiology*, 208, 65–74.

Hong, G., Chun, J., Jo, Y., & Choi, M. 2014. Effects of water or brine immersion thawing combined with ultrasound on quality attributes of frozen pork loin. *Korean Journal Food Science*, 34, 115–121.

Hong, G.P., Min, S.G., Ko, S.H., Shim, K.B., Seo, E.J., & Choi, M.J. 2007. Effects of brine immersion and electrode contact type low voltage ohmic thawing on the physico-chemical properties of pork meat. *Korean Journal Food Science*, 27(4), 416–423.

Khan, A. Q., Aldosari, F., & Hussain, S. M. 2018. Fish consumption behavior and fish farming attitude in kingdom of saudi arabia ( KSA ). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 195–199.

Kim, J. Y., Hong, G. P., Park, S. H., Spiess, W. E. L., & Min, S. G. 2006. Effect of ohmic thawing on physico_chemical properties of frozen hamburger patties. Korean *Journal Food Science*, 26(2), 223–228.

Lascorz, D., Torella, E., Lyng, J. G., & Arroyo, C. 2016. The potential of ohmic heating as an alternative to steam for heat processing shrimps. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 329–335.

Leygonie, C., Britz, T. J., & Hoffman, L. C. 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review. Meat Science, 91(2), 93–98.

Li, D., Jia, S., Zhang, L., Li, Q., Pan, J., Zhu, B., … Luo, Y. 2017. Post-thawing quality changes of common carp (Cyprinus carpio) cubes treated by high voltage electrostatic field (HVEF) during chilled storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 42, 25–32.

Li, D., Jia, S., Zhang, L., Wang, Z., Pan, J., Zhu, B., & Luo, Y. 2017 Effect of using a high voltage electrostatic field on microbial communities, degradation of adenosine triphosphate, and water loss when thawing lightly-salted, frozen common carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of Food Engineering*, 212, 226–233.

Liu, L., Llave, Y., Jin, Y., Zheng, D., Fukuoka, M., & Sakai, N. 2017. Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies. *Journal of Food Engineering*, 197, 68–77.

Llave, Y., Terada, Y., Fukuoka, M., & Sakai, N. 2014. Dielectric properties of frozen tuna and analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies. *Journal of Food Engineering*, 139, 1–9.

Mousakhani-ganjeh, A., Hamdami, N., & Soltanizadeh, N. 2016. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the lipid oxidation of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*). Innovative Food Science and Emerging Technologies, 36, 42–47.

Mousakhani-Ganjeh, A., Hamdami, N., & Soltanizadeh, N. 2015. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*). *Journal of Food Engineering*, 156, 39–44.

Mousakhani-Ganjeh, A., Hamdami, N., & Soltanizadeh, N. 2016. Thawing of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) using still air method combined with a high voltage electrostatic field. Journal of Food Engineering, 169, 149–154.

Murphy, R. Y., & Marks, B. P. 2000. Effect of meat temperature on proteins , texture , and cook loss for ground chicken breast patties. *Poultry Science*, 79(1), 99–104.

Rahbari, M., Hamdami, N., Mirzaei, H., Jafari, S. M., Kashaninejad, M., & Khomeiri, M. 2018. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein. Journal of Food Engineering, 216, 98–106.

Roiha, I. S., Tveit, G. M., Backi, C. J., Jónsson, Á., Karlsdóttir, M., & Lunestad, B. T. 2018. Effects of controlled thawing media temperatures on quality and safety of pre-rigor frozen atlantic cod (*Gadus morhua*). *LWT - Food Science and Technology*, 90, 138–144.

Shi, J., Dai, Y., Kakuda, Y., Mittal, G., & Xue, S. J. 2008. Effect of heating and exposure to light on the stability of lycopene in tomato puree. *Food Control*, 19, 514–520.

Shim, J., Lee, S. H., & Jun, S. 2010. Modeling of ohmic heating patterns of multiphase food products using computational fluid dynamics codes. *Journal of Food Engineering*, 99, 136–141.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 17, No. 1, Apr. May. 2021, p. 43- 53

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۷، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۰ ص.۵۳-۴۳

# Evaluation and Modelling of Physicochemical Changes of Tuna Fish Using Immersion Ohmic Thawing Method

**S. Fattahi, N. Zamindar***

Received: 2019.08.31
Accepted: 2020.01.26

**Introduction:** Fish is the most extremely perishable food products (Roiha *et al*, 2018) and its quality may be affected by many elements (García *et al*, 2015). The techniques used for the freezing and thawing processes play an essential function in maintaining the quality of the frozen foods. If freezing and thawing processes are carried out accurately, the quality of frozen fish will be near to fresh quality after thawing (Duygu and Ümit, 2015). There are various methods for thawing of frozen food products like still air thawing, air blast, refrigerator thawing, cold and warm water thawing, warm salt-water thawing, static water thawing and a number of innovative approaches such as high voltage electrostatic field (HVEF) thawing, ohmic, microwave, pressure-assisted, acoustic, radio frequency, infra-red and high hydrostatic pressure thawing (Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2015; Mousakhani-Ganjeh *et al*, 2016). During Ohmic heating (OH), electrical energy is altered to thermal energy within a conductor by applying an alternative current across the food product (Darvishi *et al*, 2013). The energy is approximately completely dispersed within the heated food product (Shim *et al*, 2010). A large number of applications exists for ohmic treatments including heating, cooking, thawing, blanching, evaporation, dehydration, pasteurization, fermentation and extraction (Athmaselvi *et al*, 2017; Boldaji and Borghei, 2015).

**Materials and methods:** Tuna fish (*Thunnus albacares*) obtained from Esfahan Pegah Co., Isfahan, Iran and transferred to the laboratory. The white fresh fish muscles were divided into cubes ($3 \times 3 \times 3$ cm$^3$) and instantly frozen at -30°C after vacuum packaging in polyethylene bags. The frozen samples kept at -18°C until the day of experiments. The experimental apparatus of ohmic heating comprised of a power supply, an isolating variable transformer, power analyzer and a microprocessor board. The ohmic cell was made of PTFE cylinder with two displacement stainless steel electrodes. Temperature was measured with a K-type thermocouple. The electrical conductivity (σ, mS/cm) of the brine solutions was determined before thawing at 25°C. The electrical conductivity of fish minced paste was also measured at 4°C. In the present study, the tuna cubes (27 cm$^3$) were thawed under constant ohmic power intensity (50 V) at three different brine concentrations (0.3, 0.4 and 0.5 NaCl, %w/v) during three time intervals (0, 24 and 48 hours). The parameters associated with the quality of tuna such as thawing time, thawing rate, thawing, cooking and total losses, centrifugal loss, lipid oxidation, texture and color were investigated during OH thawing. Changes in the thawing, cooking and total losses, WHC, texture, *L**, *a**, *b** and color changes were studied as kinetic models.

**Results and Discussion:** Results showed that, thawing under immersion ohmic thawing significantly decreased the thawing time of frozen tuna fish cubes. Suitable kinetic models with the highest regression coefficient described dependent parameters. In addition, kinetic models were validated by $R^2$ and RMSE. Statistical analysis showed that the interaction effects of two parameters (concentration * time) on thawing loss were significant ($p \leq 0.05$). The lowest thawing loss was observed at 0.3 and 0.5 %w/v NaCl immediately after thawing. The lowest cooking loss was seen at highest brine concentration and the lowest total loss was observed at time zero after thawing ($p \leq 0.01$). The WHC of meat product is one of the most important factors affecting economical value and meat quality due to the weight change during thawing. In this study, WHC increased by increasing the brine concentration. In addition, oxidation of lipids did not occur, and TBA index did not differ significantly. This was probably due to the high speed of immersion ohmic thawing. The highest shear force was related to the treated sample with the lowest brine concentration. The highest *a** was indicated immediately after thawing. Immersion ohmic thawing saved time and led to reducing the losses parameters. In addition, WHC was maintained at the highest possible level. Fish and fishery products are very perishable materials and no oxidation was observed during immersion ohmic thawing regarding the presence of NaCl,.

**Keywords**: Ohmic thawing, Kinetic model thawing, Tuna fish, Ohmic heating

(*Corresponding author's email: n.zamindar@khuisf.ac.ir)